

論文

[1139] 直流電流による鉄筋近傍へのNaイオンの集中とその後の再分散

宇田川秀行*1・芦田 公伸*2・石橋 孝一*2・半田 実*3

1. はじめに

海岸近辺等で飛来塩分を多量に受ける場所に位置するコンクリート構造物や冬期に道路に融雪剤を散布する地域にあるコンクリート構造物は、コンクリート内部に塩分が浸透し、鉄筋の腐食等の被害をもたらしている。この様な塩害を受けたコンクリート構造物を補修する場合、コンクリートにひびわれや欠落が発生した後で行われるのが一般的であり、しかも、ひびわれや欠落、鉄筋の発錆の箇所等のみ補修される。従って、劣化の根本原因であるコンクリート中の塩分の除去については、何ら処置がなされていない。

最近、新しい補修方法として、コンクリートの内部鉄筋を陰極に、コンクリート表面に陽極を設置して、その間に直流電流を一定時間流すことにより、コンクリート中の塩分を鉄筋周辺からコンクリートの表面外へ移動させる脱塩方法が開発されている[1]。また、この方法において、現実にコンクリート中の塩分が移動することも報告されている[2]。一方、コンクリート中に直流電流を流すことによる陰極付近の影響については、必ずしも明らかになっていない。

本研究では、直流電流を鉄筋コンクリート中に流すことによる鉄筋近傍のコンクリートについて、特にアルカリの濃縮によるコンクリートへの影響を調べるために、通電前後におけるNaイオン濃度、細孔径分布、自然電位、付着強度等を実構造物とコンクリート試験体を用いて試験したので、その結果を報告する。

2. 実構造物を用いた試験

2.1 実構造物の概要

完成後30数年経過した原塩用貯蔵庫の鉄筋コンクリート壁の一部(高さ3m、幅6.5m)を用いて、コンクリート中の鉄筋を陰極に、コンクリート表面に陽極となる金属メッシュを設置した。なお、金属メッシュにセルローズファイバーと水酸化カルシウム水溶液を吹き付けることにより陽極部分の導電性を高めた。この壁の配置は図-1に示す様に、原塩貯蔵庫と塩化ナトリウム水溶液飽和槽との間にあり、塩分は壁の両側から浸透する。この壁には公称径22mmの異形鉄筋が縦横200mmピッチ、かぶり厚さ約6.5cmで配筋されている。なお、コンクリートの配合については、セメント協会コンクリート専門委員会の推定法に従って、表-1の様に推定した。

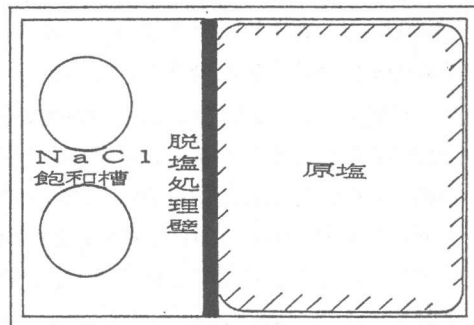


図-1 試験壁の位置

表-1 推定配合

| 単位量 (kg/m ³) | | | |
|--------------------------|-----|-----|------|
| C | W | S | G |
| 299 | 185 | 710 | 1054 |

*1 電気化学工業株本社特殊混和材事業部開発課、課長 (正会員)

*2 電気化学工業株青海工場特殊混和材部研究室、(正会員)

*3 電気化学工業株青海工場特殊混和材部研究室、室長 (正会員)

2.2 実験方法

(1) 電流密度と通電時間

塩化ナトリウム水溶液飽和槽側のコンクリート壁表面に設置した金属メッシュとコンクリート内部の鉄筋との間に、直流電源装置を用いて、コンクリート表面積当たり $1\text{A}/\text{m}^2$ (鉄筋の表面積当たり $1.5\text{A}/\text{m}^2$) の直流電流を最大9週間流した。なお、電圧は25~35Vであった。

(2) サンプル採取位置

コンクリートサンプルは、飽和槽側のコンクリート表面から鉄筋をめがけて、コアドリルで外径50mmのコアサンプルを採取した。また、コアサンプルを図-2に示すように深さ方向3cm間隔で3つに切斷し、それぞれを表面部、中間部、鉄筋部として分析を行った。

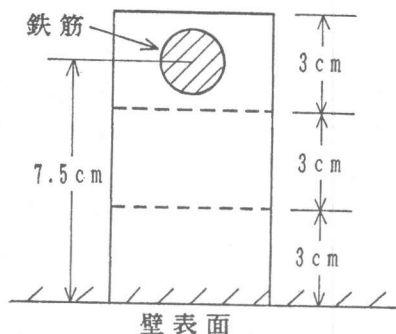


図-2 サンプルリング位置

(3) 分析方法

コンクリート中の含有塩分量は、コンクリートサンプルを0.15mm以下に粉砕した後、チオシアン酸水銀法による吸光度法にて全塩分量として分析した。Naイオン量も、同様に0.15mm以下に粉砕してから、試料2gに20ccの蒸留水を加え、10分間煮沸、放冷後濾過し、1+1塩酸5ccを加えて200ccに希釈し、この液を原子吸光度法で測定した。細孔径分布は、コンクリートサンプルから砂利を取り除き、モルタル分として1.0~2.5mmに粉砕したものを水銀ポロシメータにて測定した。

2.3 実験結果と考察

通電開始前、および、通電開始後3週、6週、9週の時点における含有塩分量の結果を図-3に示す。また、通電開始前、および、通電開始後3週、6週、9週の時点におけるNaイオン量の結果を図-4に、さらに、電流を停止した時点からの経過時間2ヶ月、4ヶ月、6ヶ月後におけるNaイオン量の結果を図-5にそれぞれ示す。さらに、通電開始前、および、通電開始後3週、9週の時点におけるコンクリートの表面部分と鉄筋部分の細孔径分布を図-6と図-7に示す。

(1) 含有塩分量

通電開始前におけるコンクリート中の含有塩分量は、表面部分が最も高くC1で $10.5\text{kg}/\text{m}^3$ 、続いて、中間部 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$ 、鉄筋部 $0.8\text{kg}/\text{m}^3$ であった。直流電流を流し始めると、いずれの位置においても含有塩分量が速やかに減少し、通電時間9週間後では $0.15\sim 0.8\text{kg}/\text{m}^3$ にまで減っている。

(2) Naイオン量

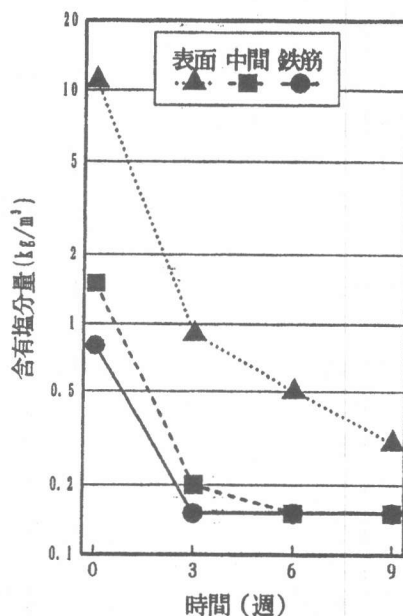


図-3 通電時間と含有塩分量

通電開始前におけるコンクリート中のNaイオン量は、表面部が最も高く、続いて中間部、鉄筋部であり、含有塩分量と同一の傾向であった。これは、コンクリートへの塩分の供給がNaClという形で表面部から

行われてきたため、このような傾向になっているものと思われる。
 図-4では、コンクリートに電流を流し始めると、コンクリートの表面部のNaイオン量が減少し、逆に、鉄筋周辺部が増加し、通電開始後9週間では、鉄筋付近のNaイオン量が他の部分と比較し、かなり高い値になり、イオンの分布が片寄った状態になっている。

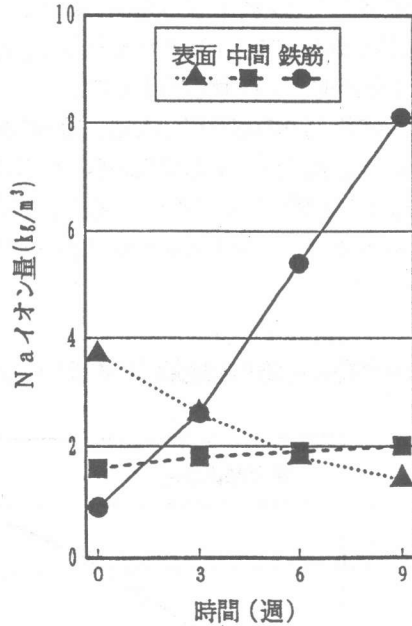


図-4 通電時間とイオン量

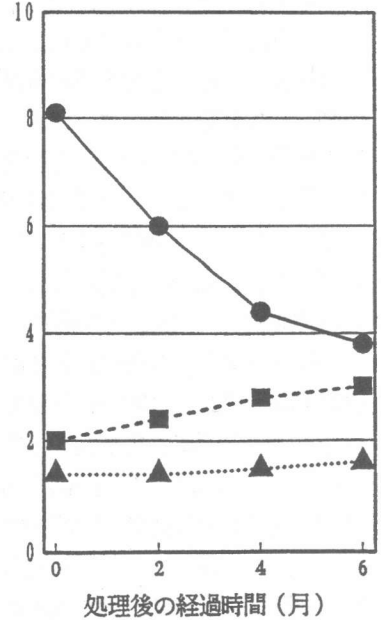


図-5 処理後の時間とイオン量

従って、直流電流を流し続けている間は、このイオンの片寄った分布状態が維持されるものと思われる。

図-5は、図-4の通電開始後9週間の時点で直流電流の供給を終了し、その後、片寄りを是正する方向にNaイオンが再び分散していく状態を示している。この図は、直流電流を流すことにより、一時的に鉄筋付近のNaイオン量が他の部分より高い値になっていても、電流を止めれば、Naイオンは比較的短期間に拡散し、全体的に平均化していくことを示している。

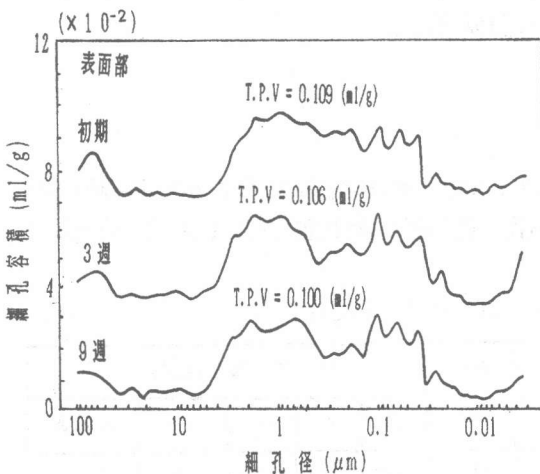


図-6 表面部の細孔径分布

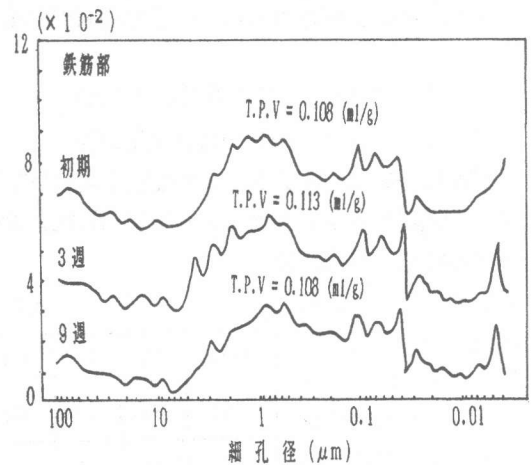


図-7 鉄筋付近の細孔径分布

(3) 細孔径分布

コンクリート壁の表面部分と鉄筋付近から採取したサンプルを用いて、細孔径分布を調べた。なお、サンプリングは、通電開始前（初期）と通電開始後3週間、および、9週間とした。

表面部分の結果を図-6に、鉄筋付近の結果を図-7にそれぞれ示す。なお、複数のサンプルの分析結果から、全細孔量のほぼ等しい結果について比較検討した。

図-6の結果から、コンクリート壁の表面部分の細孔径分布は、通電の前後において、および、通電期間において、ほとんど変化はない。また、図-7の結果から、鉄筋周辺のコンクリートにおける細孔径分布も、通電の前後、および、通電期間において、ほとんど変化はない。従って、この結果からは、実構造物のコンクリートでは、直流電流をコンクリート中に流すことによる細孔径への影響はないと思われる。

(4) 通電後の自然電位の変化

鉄筋コンクリート壁中にある鉄筋の自然電位を飽和硫酸銅電極を用いて測定した。通電前の自然電位は、 $-320 \sim -430$ (mV CSE) であり、ほぼ全面にわたり腐食していると判断された。この壁に9週間直流電流を流した後、電流を停止した。電流停止後、再び自然電位を測定し、その後16週間まで経時的に測定した。その結果を図-8に示す。

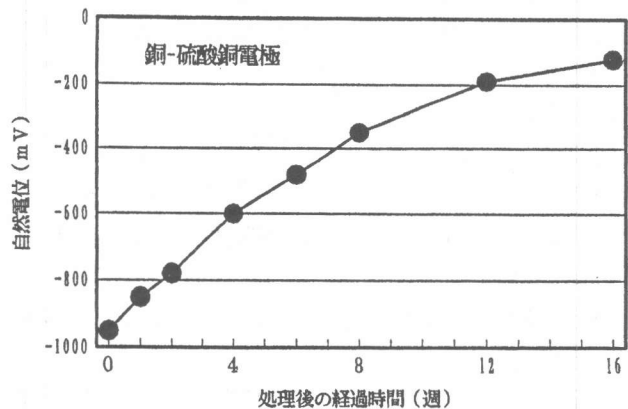


図-8 処理後の自然電位の変化

自然電位は、通電終了直後には -940 (mV CSE) にまで変化していたが、電流停止後時間の経過と共に上昇し、8週経過時点で通電前の状態になり、16週経過時点では

-120 (mV CSE) となった。この現象は、鉄筋に電圧を加えたために、見かけ上、自然電位が卑な方向へ移動し、通電終了後時間の経過と共に不動態が再形成されることにより、貴な方向へ進行しているものと推測されるが、今後の検討が必要と思われる。

3. コンクリート試験体を用いた試験

3.1 コンクリート配合と使用材料

試験に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。また、セメントは表-3に示す化学組成を有する普通ポルトランドセメントを使用した。骨材は、姫川産川砂(比重2.62、F.M.=2.75)と姫川産砕石($G_{max}=20$ mm、比

重2.65、F.M.=6.61)

を使用した。なお、Naイオンは、セメント中のNaイオン以外にも、食塩(NaClの純度99.0%)と

表-2 コンクリート配合

| G _{max} (mm) | SL (cm) | Air (%) | w/c (%) | S/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|------|-----|
| | | | | | C | W | S | G | AEA |
| 20 | 18 | 4 | 60 | 46.5 | 280 | 168 | 860 | 1002 | 0.7 |

して5kg/m³を混練り水に溶解し、コンクリート中に均一に分散させた。また、養生方法は、

打設翌日脱型後、直ちにビニール袋で密封し、材令28日まで20℃の湿空養生とした。

コンクリートの供試体は、断面が15cm×15cm、長さ40cmの直方体とし、その中心部、長さ方向に公称径22mmの丸鋼を有するものとした。

3.2 実験方法

コンクリート試験体中の鉄筋を陰極に、コンクリート外部の電解質溶液に陽極を設置した。概略を図-9に示す。なお、コンクリート試験体の上下面を除いた周囲4面はエポキシ系塗料で絶縁した。電解質溶液に浸漬されているコンクリートの下面1m²当たり1Aの電流を3週、5週、7週、9週間流し、コンクリート試験体中のNaイオンの移動を調べた。また、通電終了後、コンクリート試験体の下面を常に水道水に浸し、十分な湿潤状態に保った。

3.3 Naイオン量の結果と考察

所定の時間電流を流したコンクリート供試体の断面を図-10に示すようにダイヤモンドカッターで3cm角に切断し、その切断片に含まれているNaイオン量を分析した。なお、図-10の切片1はコンクリート表面部、切片2はその中間である。

図-11は、通電前と通電開始後3週、

表-3 セメントの化学組成

| lg-loss | Insol | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O |
|---------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|-------------------|------------------|
| 1.8 | 0.2 | 21.5 | 5.3 | 3.1 | 64.6 | 0.8 | 2.1 | 0.32 | 0.40 |

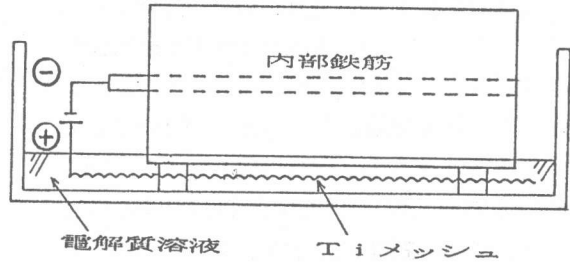


図-9 通電方法

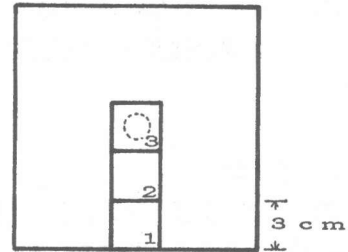


図-10 サンプル位置

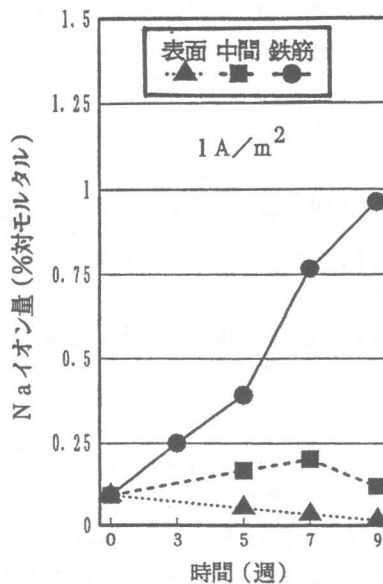


図-11 通電時間とイオン量

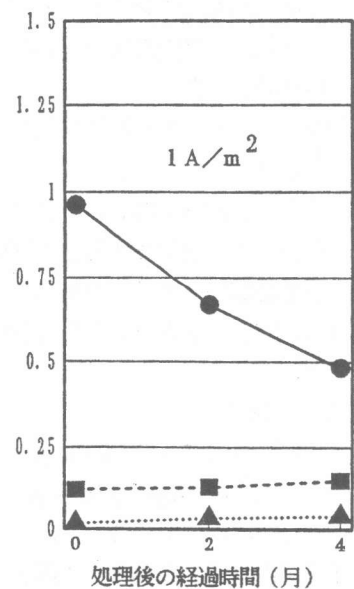


図-12 処理後の時間とイオン量

5週、7週、9週の時点でのNaイオン量を示し、図-12は、電流を停止した時点からの経過時間2ヶ月、4ヶ月後におけるNaイオン量を示す。これらの図より、コンクリート試験体においても、電流停止後、Naイオンが比較的短期間に拡散し、全体的に平均化していくことがわかる。

3.4 付着強度の結果と考察

3.1のコンクリート配合と公称径22mmの丸鋼を用いて、コンクリートの外径15cm、高さ15cmの引抜き試験体を作り、図-13の方法で直流電流を流した。電流はコンクリート表面積当たり0.5、1、2、4 A/m²とした。鉄筋表面積当たりでは、それぞれ3.4、6.8、14、27A/m²となる。通電処理を行っていない試験体の各試験材令における付着強度を100とした場合の付着強度比を図-14に示す。付着強度は、鉄筋の表面積当たり6.8 A/m²以下では通電時間に係わりなく、強度低下は観察されないが、14A/m²以上では、大幅な強度低下が観察された。

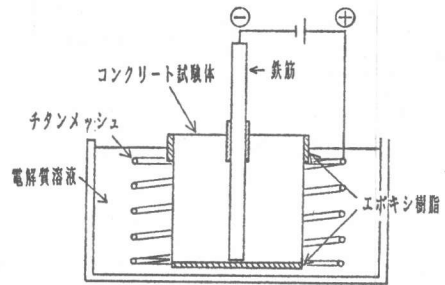


図-13 引抜き試験体の通電方法

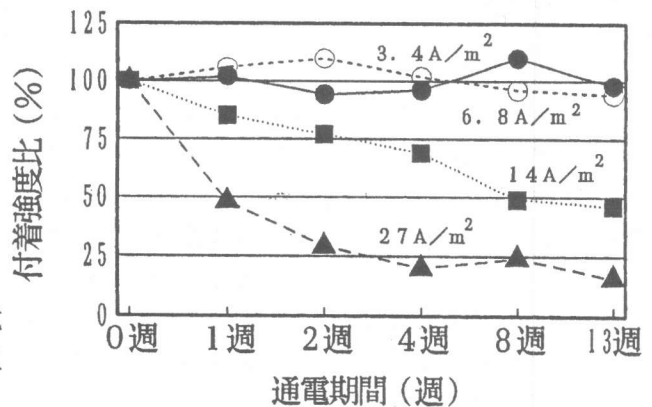


図-14 通電時間と付着強度比

4. まとめ

実構造物、および、コンクリート試験体を用いた今回の実験結果から、以下のことが言える。

- (1) 実構造物において、コンクリート中に直流電流を流した場合、陰極である鉄筋周囲のコンクリート中のNaイオン濃度が増加する傾向がある。しかし、電流を停止した後は、時間の経過と共に、Naイオンの再拡散が起こり、安定域へ平均化していくことが確認された。
- (2) コンクリート中に電流を流すことによる細孔径分布への影響は、実構造物において観察されなかった。
- (3) 鉄筋の自然電位は、コンクリート中に電流を流すことにより、一時的には卑の方向へ移動するが、電流を停止すると時間の経過と共に貴の方向へ移動し、不動態が形成される安定な自然電位域に達することが実構造物で確認された。
- (4) コンクリートと鉄筋との付着強度は、鉄筋の表面積当たり14A/m²以上で強度低下が観察された。

[参考文献]

- [1] Miller, J.B.: Chloride Removal and Corrosion Protection of Re-inforced Concrete, Proc. of Strategic Highway Research Program and Traffic Safety on Two Continents in Gothenburg, Swedish Road and Traffic Research Institute, Sept. 1989
- [2] 芦田公伸・石橋孝一: 直流電流によるコンクリート中の塩分の移動、コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム論文報告集、pp.29-34、1992.10